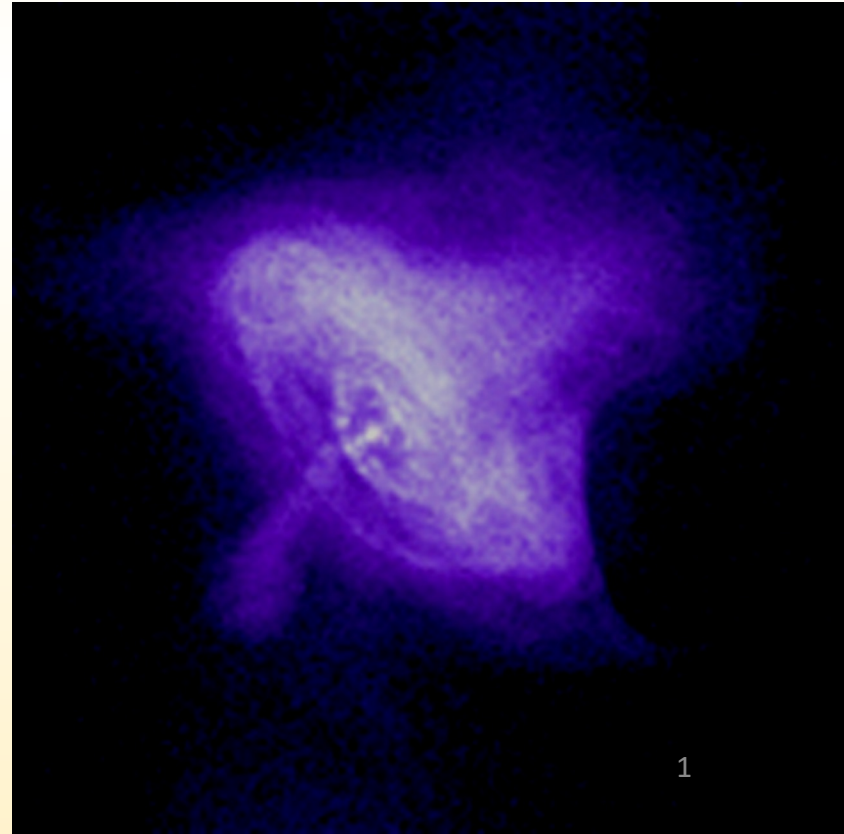
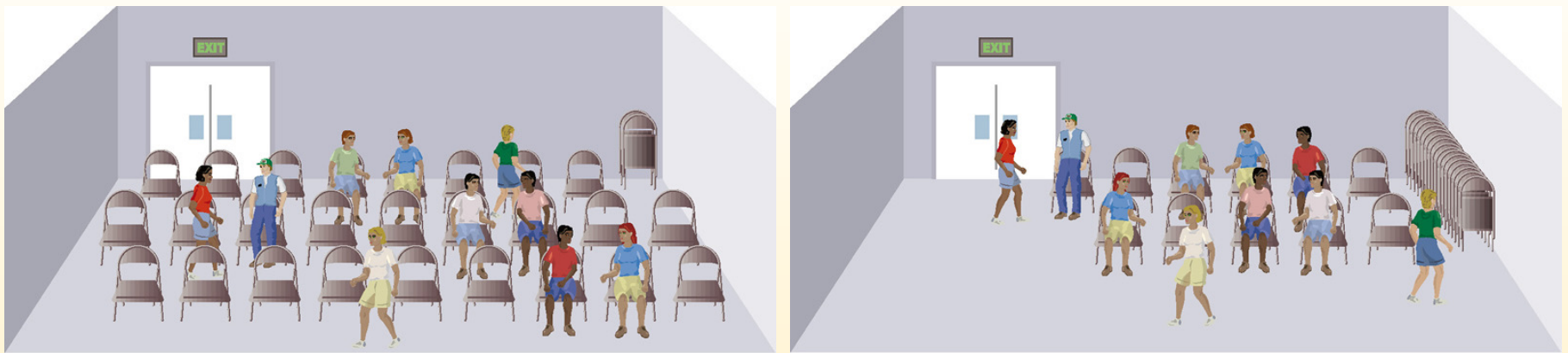


# 22 - El cementerio estelar exótico



# La presión de degeneración

Dos partículas no pueden ocupar el mismo espacio con la misma cantidad de movimiento (energía). Para las materias sólidas muy densas, los electrones no pueden estar en su estado fundamental, se convierten en más enérgicos - acercándose a la velocidad de la luz - los electrones juegan a un juego de sillas. La presión hasta que se balancea la estrella ya no depende de la temperatura.



# Objetos Degenerados

En el núcleo restante de una estrella muerta...

- presión de degeneración apoya la estrella contra el colapso de gravedad. Una estrella puede tener degeneración con el apoyo de:
- presión de degeneración de los electrones - se llama una **enana blanca**
- la presión de degeneración de neutrones - se llama **estrella de neutrones**
- Si el núcleo remanente es tan masivo que la fuerza de gravedad es mayor que la presión de degeneración de neutrones ...la estrella se derrumba de la existencia y se llama un **agujero negro**

# Restos de núcleo degenerado

- La estrella central de una nebulosa planetaria se calienta a medida que se derrumba.
- La estrella no tiene una masa suficiente para calentarse lo suficiente para fusionar carbono.
- La gravedad es finalmente detenida por la fuerza de la presión de degeneración de los electrones. La estrella es ahora estable ... .. Una **enana blanca**

# White Dwarfs (Enanas Blancas, WD)

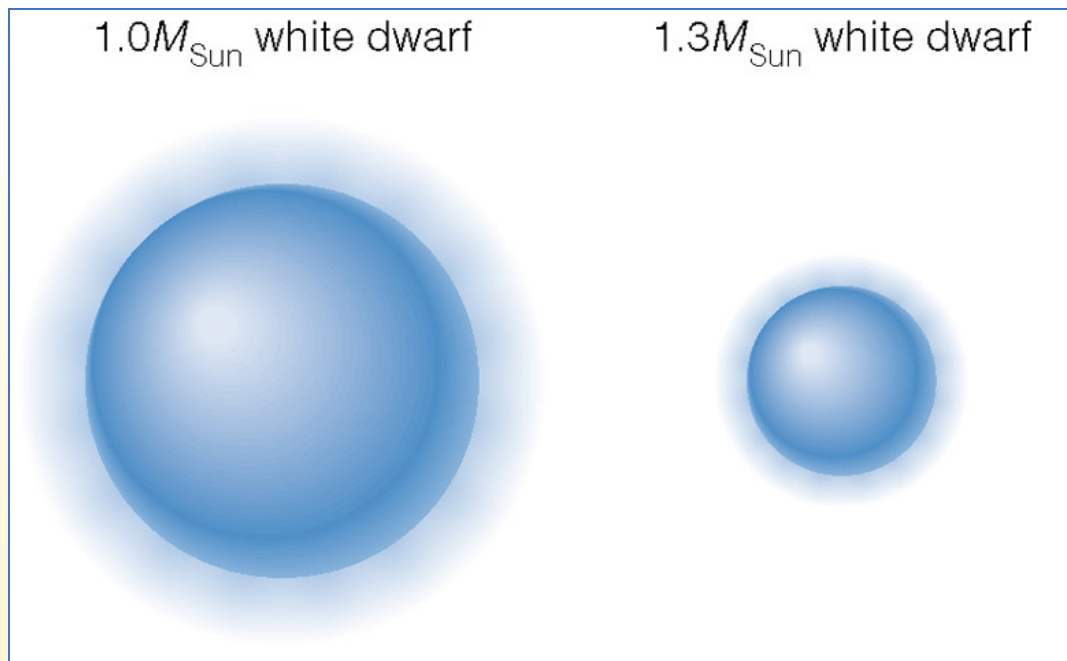
- Son estables ...
- gravedad vs presión de degeneración de electrones
- No generan energía.
- Pasarán por el diagrama HR, irradian su calor y poco a poco se ponen más fríos y más débiles
- Son muy densos: tienen 0,5 a 1,4  $M_{\text{sun}}$  en una esfera del tamaño de la Tierra!

Sirio B es la enana blanca más cercana a nosotros



*Sirius A + B* en rayos X

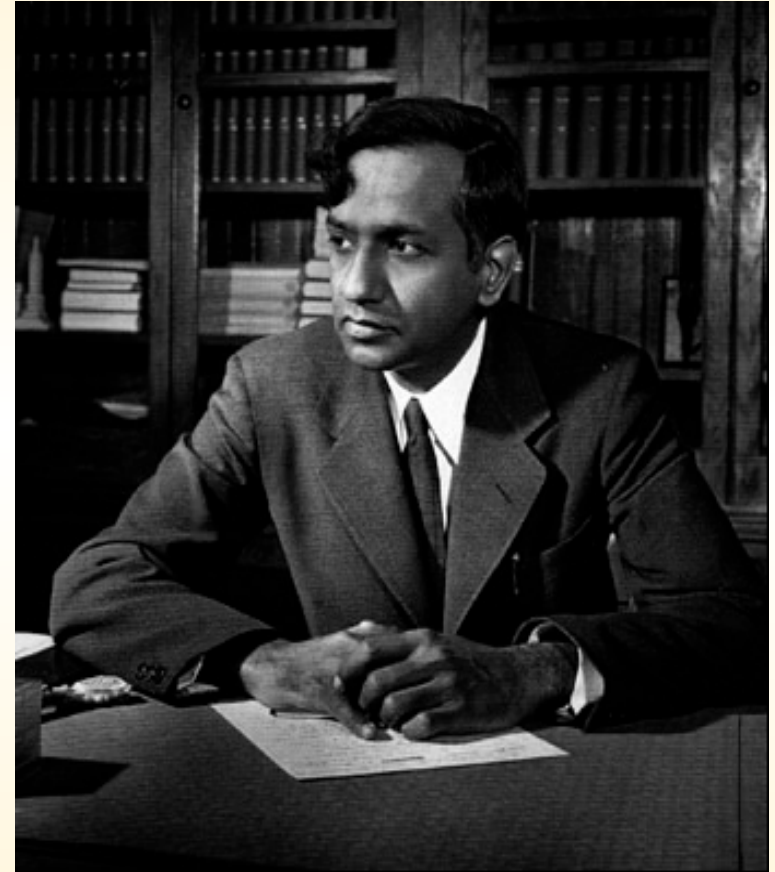
- Materia degenerada obedece a leyes diferentes de la física.
- Una estrella más masiva se convierte en una enana blanca más pequeña.
- Un aumento en la gravedad hace que la WD es más densa.
- Una densidad mayor aumenta la presión de degeneración que equilibra la gravedad.



# Limitación de la masa de WD

Chandrasekhar formuló las leyes de la materia degenerada. Por esto ganó el Premio Nobel de Física.

También predijo que la gravedad supera la presión de degeneración electrónica si una enana blanca tiene una masa superior a  $1,4 M_{\text{sun}}$ , porque electrones de alta energía, que causan esta presión, alcanzan la velocidad de la luz. Este límite se llama:



Subrahmanyan Chandrasekhar  
(1910-1995)

**Chandrasekhar Limit** (limite de Chandrasekhar)



Si una enana blanca se encuentra en un sistema binario cercano:

- La WD “accretes” materia de su compañera
- La materia forma un disco alrededor de la WD
- fricción en el disco de acreción se calienta
- emite luz visible, ultravioleta y rayos-X
- si la materia cae en la WD, fusión de H comienza
- La WD es temporalmente más brillante.

→ vemos una **Nova**

# Novae

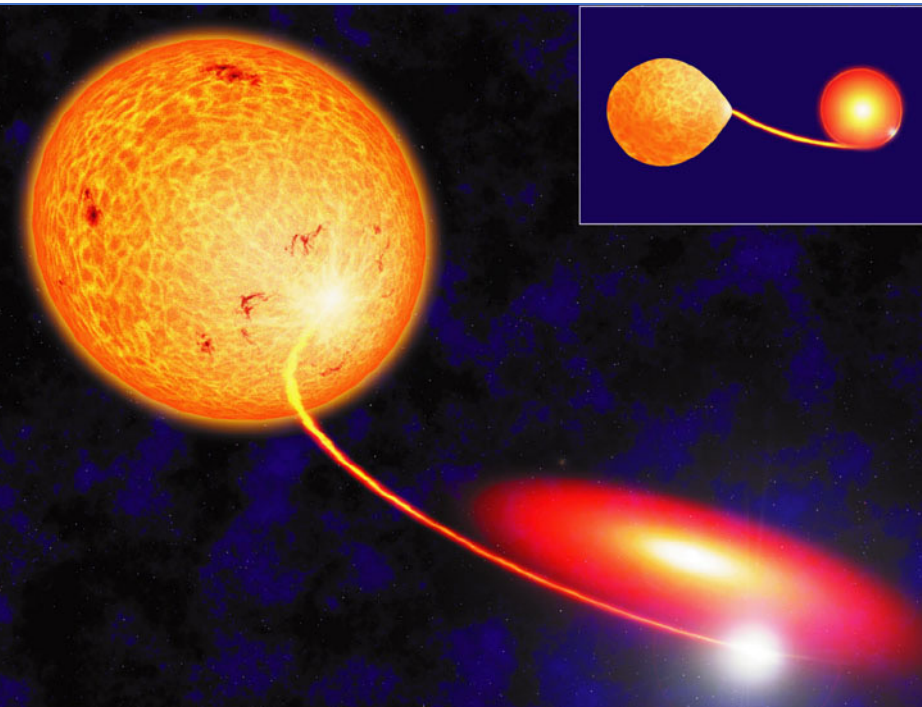
La palabra proviene del latín Stella Nova (estrella nueva).

Los griegos y romanos antiguos la definieron como una estrella que apareció de repente!

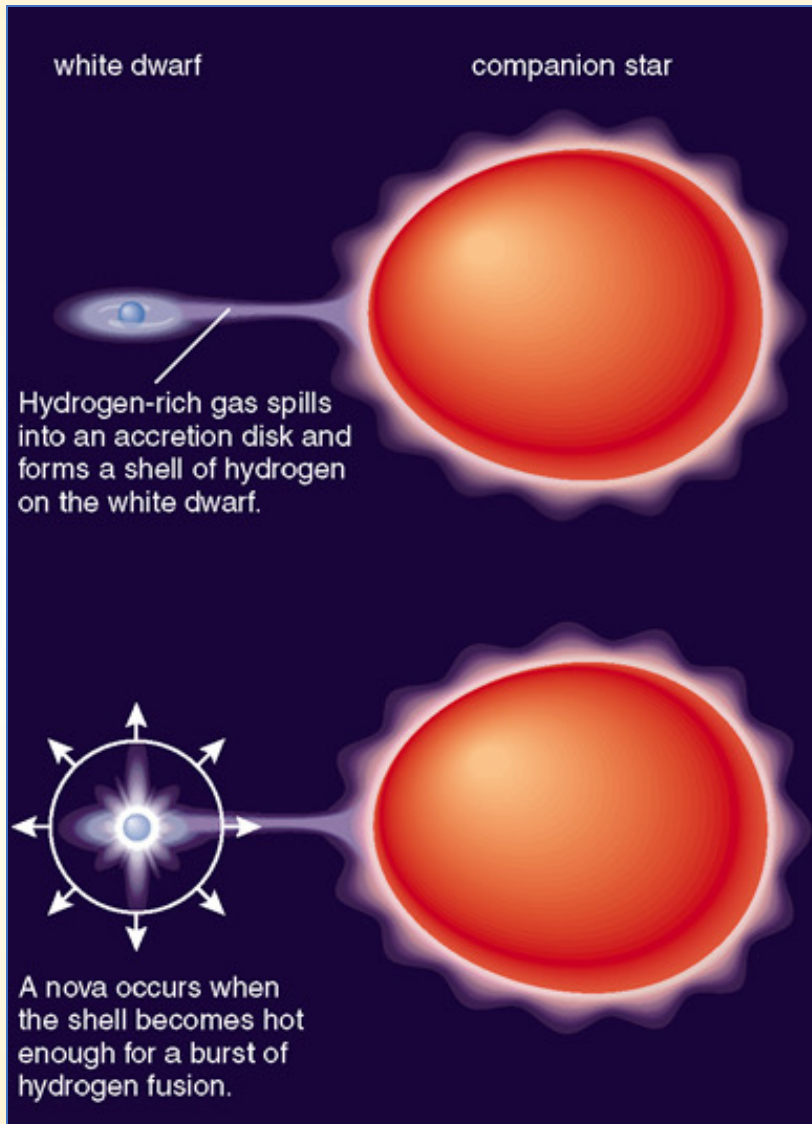
En realidad, la estrella no es nueva, solo se hace mucho más brillante en pocos días.

Como no tenían telescopios, estas estrellas son normalmente demasiado débiles para ser vistas - de ahí que aparecen de repente.

- Por lo general aumenta su brillo desde 5 hasta 10 magnitudes por unos días, luego se desvanecen.
- Algunas aumentan hasta 20 magnitudes y duran semanas, luego se desvanecen lentamente. Llamamos éstas **supernovas**.

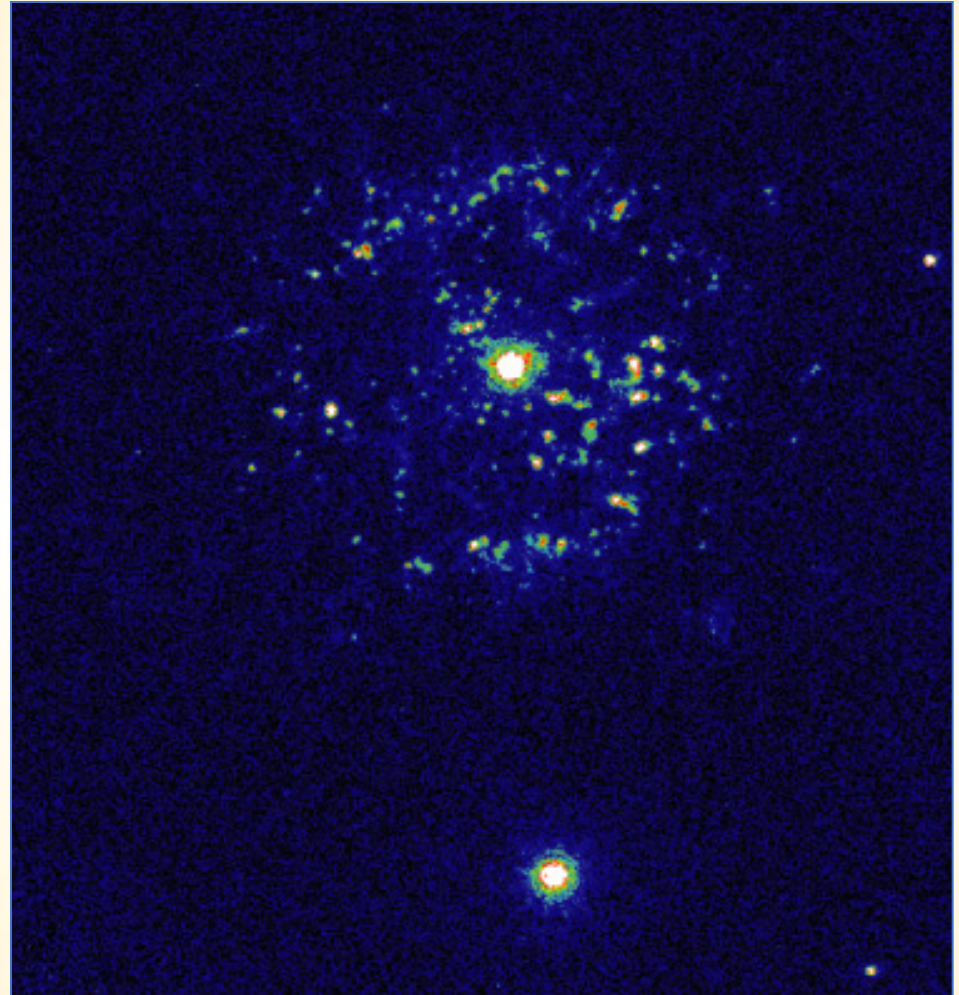


- Un **disco de acreción (accretion disc)** es un disco giratorio de gas que orbita una estrella.
- Formada por materia que cae en la estrella.
- La acumulación de hidrógeno en la superficie de la enana blanca puede encenderse en una reacción de fusión explosiva que se descarga de una capa de gas.



- A pesar de que esta capa contiene una pequeña cantidad de masa ( $0,0001M_{\text{sun}}$ ), puede causar que la enana blanca ilumine unos 10 magnitudes más (10.000 veces) en unos pocos días.

- Debido a que la masa perdida es tan poca durante una nova, la explosión no perturba el sistema binario.
- Hidrógeno puede caer a la WD una vez más y también la ignición del hidrógeno puede reaparecer de nuevo con períodos que van de meses a miles de años.



Nova *T Pyxidis*  
Hubble Space Telescope

# White Dwarf Supernovae

## (supernovae de las enanas blancas)

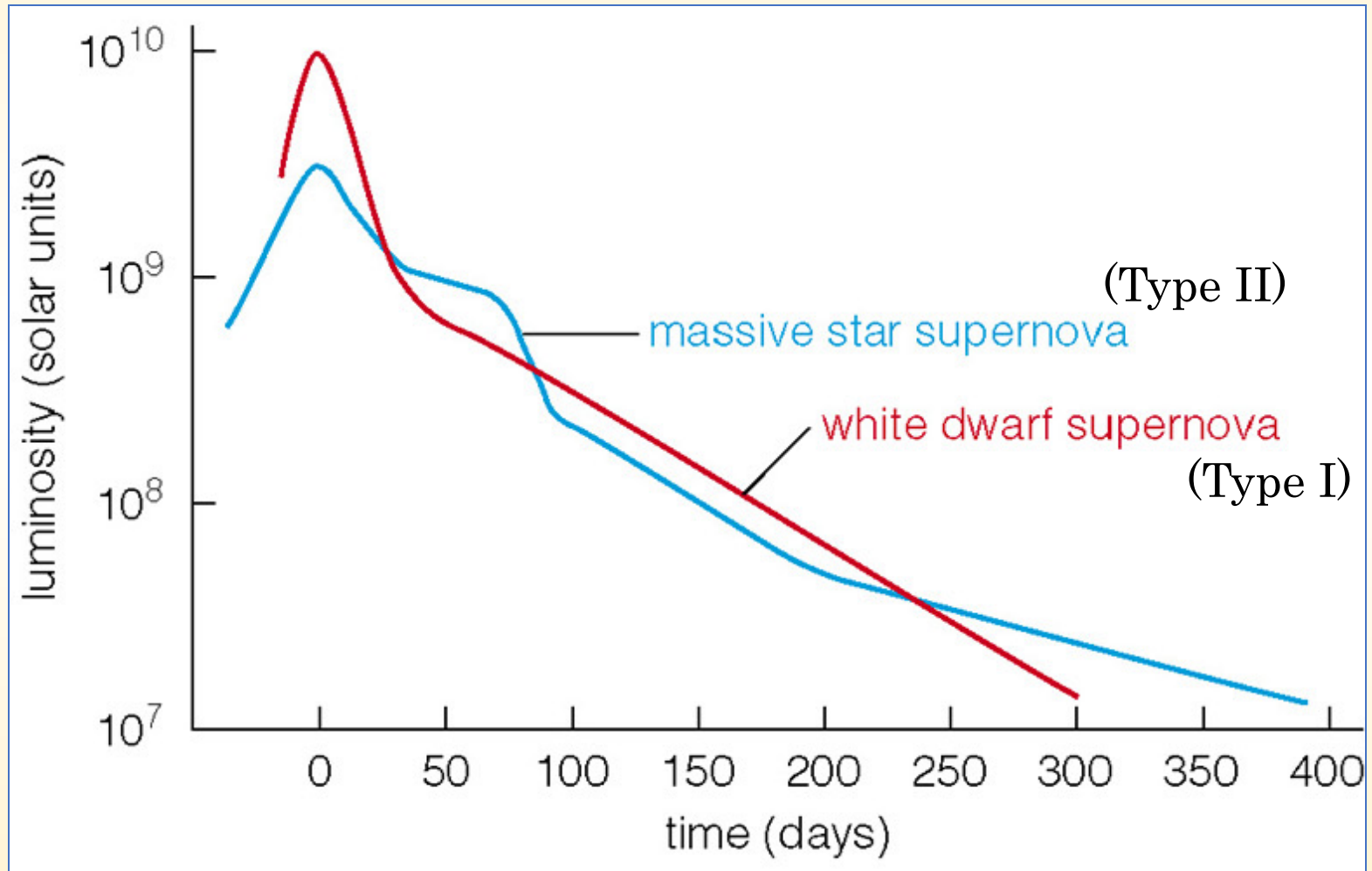
- Si la acumulación trae la masa de una enana blanca por encima del límite de Chandrasekhar, la degeneración de electrones ya no puede apoyar a la estrella.
- La enana blanca colapsa.
- El colapso eleva la temperatura interna y la fusión de carbono fuera de control comienza, lo que conduce finalmente a una explosión de la estrella.
- Tal explosión de una enana blanca se llama una **supernova enana blanca**.



- Mientras que una nova puede alcanzar una magnitud absoluta de -8 (alrededor de 100 mil soles)
- Una supernova enana blanca alcanza una magnitud absoluta de -19 (10 mil millones de Soles).
- Ya que todos llegan a la misma luminosidad máxima, WD supernovas son buenos indicadores de distancia
- Son más luminosas que las estrellas variables Cefeidas.
- Por eso pueden ser utilizadas para medir distancias mayores que las variables Cefeidas.
- Hay dos tipos de supernovas:
  - **enana blanca**: no hay líneas prominentes de hidrógeno visibles, se cree que WD son el origen
  - **estrellas masivas**: contienen líneas prominentes de hidrógeno, son el resultado de la explosión de una estrella solitaria.

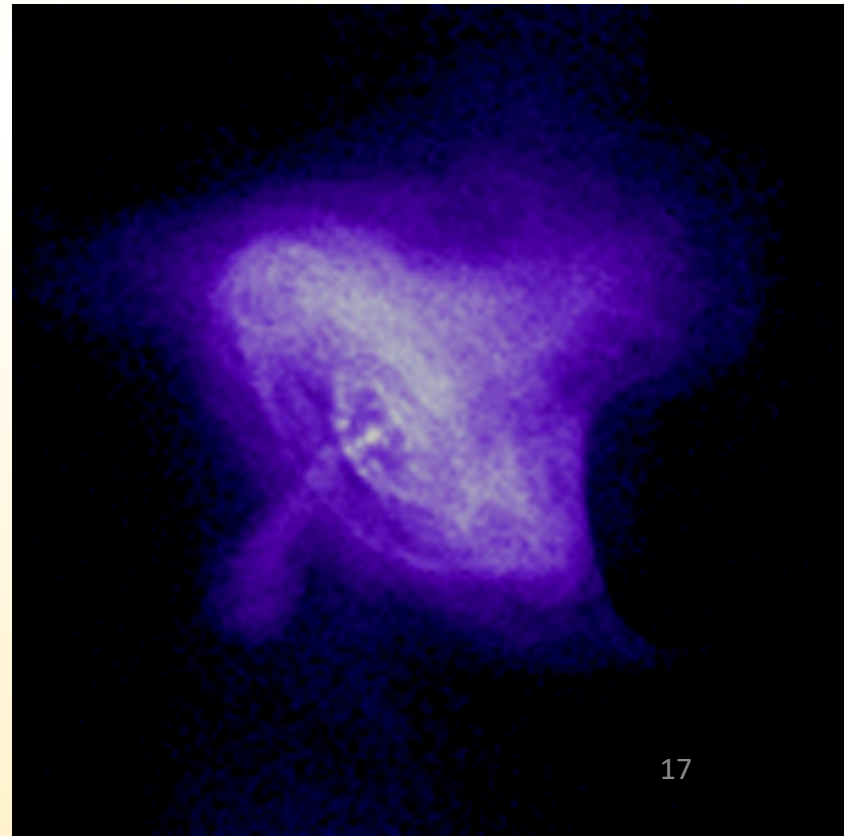
# Supernova Light Curves

curvas de la luminosidad de supernovas





# Estrellas de Neutrones y Agujeros Negros

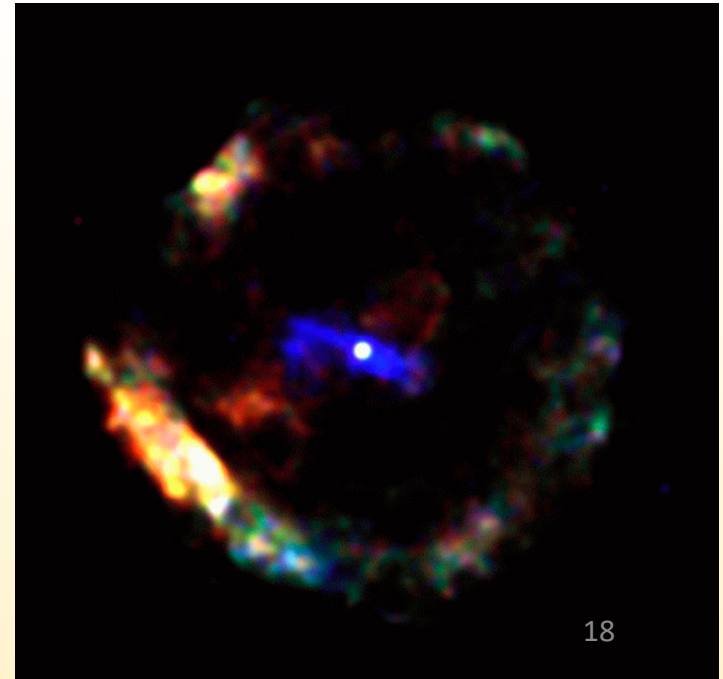


# Neutron Stars (Estrellas de neutrones)

- Son los restos de núcleos de explosiones de supernova.
- Si el núcleo tiene  $< 3 M_{\text{sun}}$  se deja de colapsar y es sostenido por la presión de degeneración de neutrones.
- Las estrellas de neutrones son muy densas ( $10^{12} \text{g} / \text{cm}^3$ )
- Una estrella de neutrones de  $1,5 M_{\text{sun}}$  tiene un diámetro de 10-20 km
- Ellos giran muy rápido: Periodo = 0,03 a 4 s
- Sus campos magnéticos son  $10^{13}$  veces más fuertes que la Tierra.

Imagen de Chandra de rayos X de la estrella de neutrones que es un resto de una supernova observada en el año 386.

El remanente que se conoce como G11.2-0,3



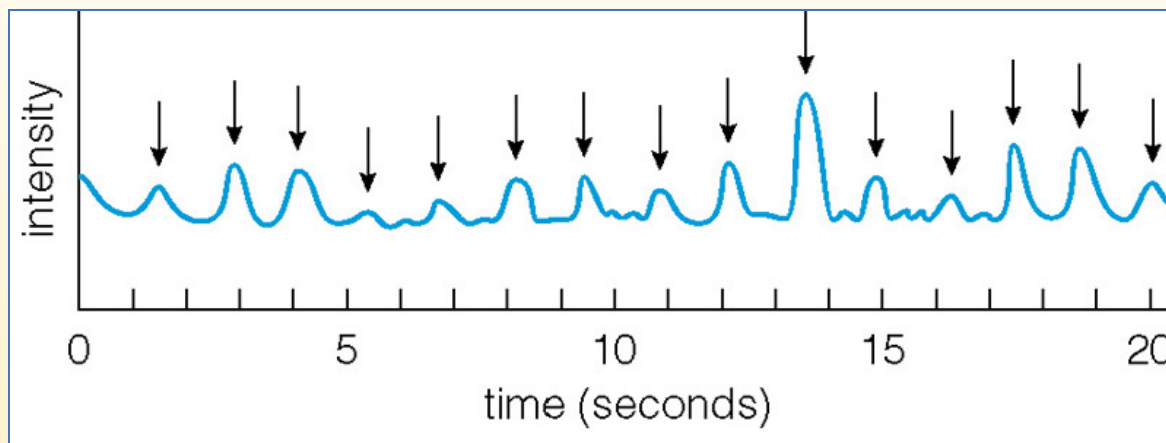
# Pulsars (Púlsares)

- En 1967, la estudiante graduada Jocelyn Bell y Anthony Hewish, su asesor, descubrieron accidentalmente una fuente de radio en Vulpecula.
- Fue un pulso fuerte que volvía cada 1,3 seg.
- Se determinó que tiene una distancia de 300 pc.
- Lo llamaron un púlsar, pero ¿qué era?



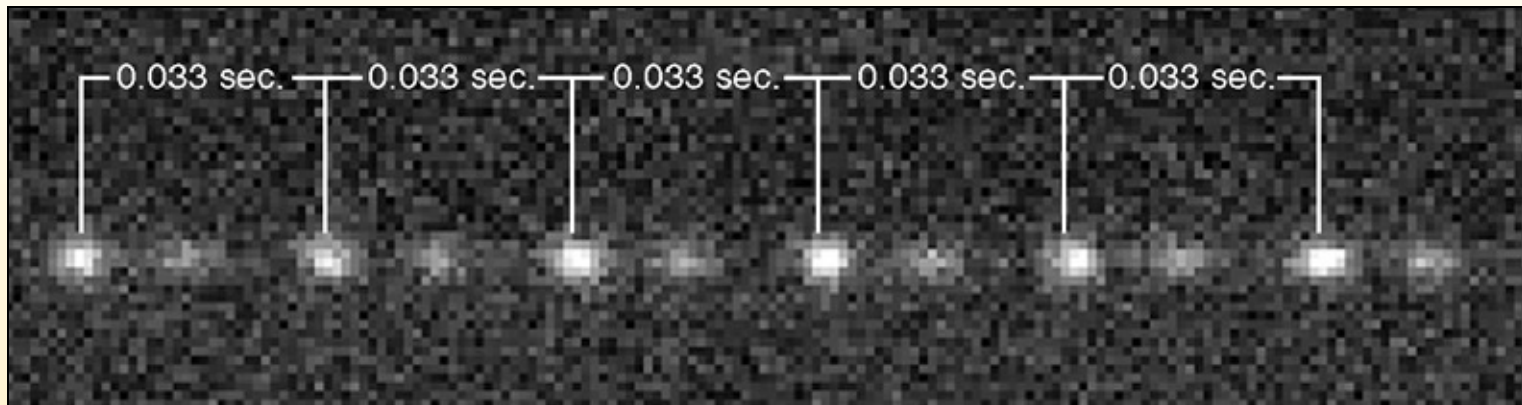
Jocelyn Bell

Light Curve de Púlsar de Jocelyn Bell



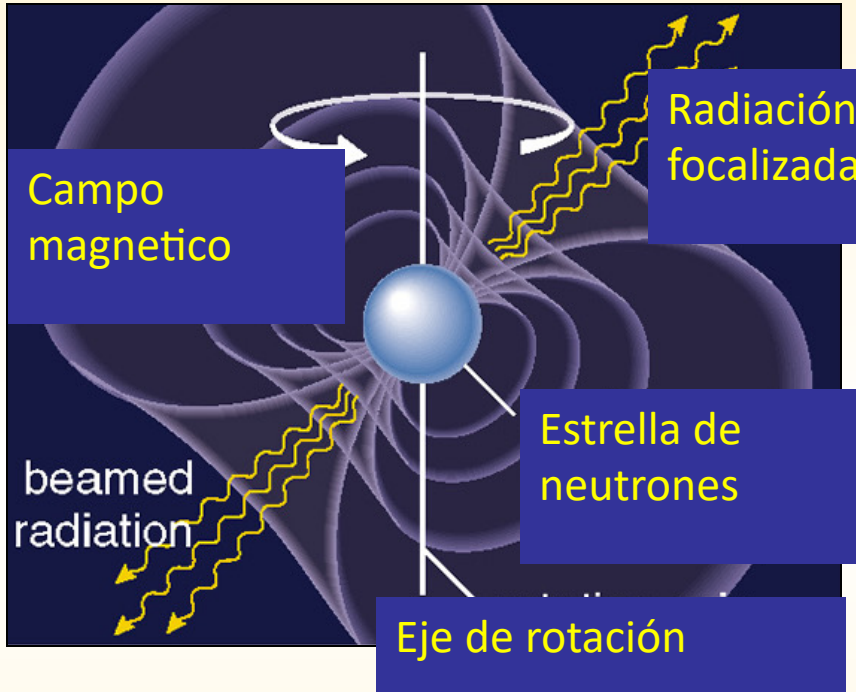
El misterio se resolvió cuando un púlsar fue descubierto en el corazón de la Nebulosa del Cangrejo.

El púlsar del Cangrejo también pulsa en luz visible.



# Púlsares y estrellas de neutrones

- Todos los púlsares son estrellas de neutrones.
- Pero todas las estrellas de neutrones no son púlsares!
- Tenemos emisión de synchrotron, un proceso no-térmico donde la luz es emitida por las partículas cargadas que se mueven cerca de la velocidad de la luz alrededor de campos magnéticos.
- Esta emisión (radio en su mayoría) se concentra en los polos magnéticos y se centra en un haz de luz (en bandas de radio) – un jet (corriente en chorro).
- Si vemos un púlsar depende de la geometría:
  - Si el haz del jet polar pasa por la dirección de la Tierra una vez cada rotación, la estrella de neutrones parece ser un púlsar.
  - Si el haz del jet polar está siempre apuntando hacia la Tierra o siempre apuntando en otra dirección, no vemos un púlsar.



Los púlsares son los faros de la galaxia!

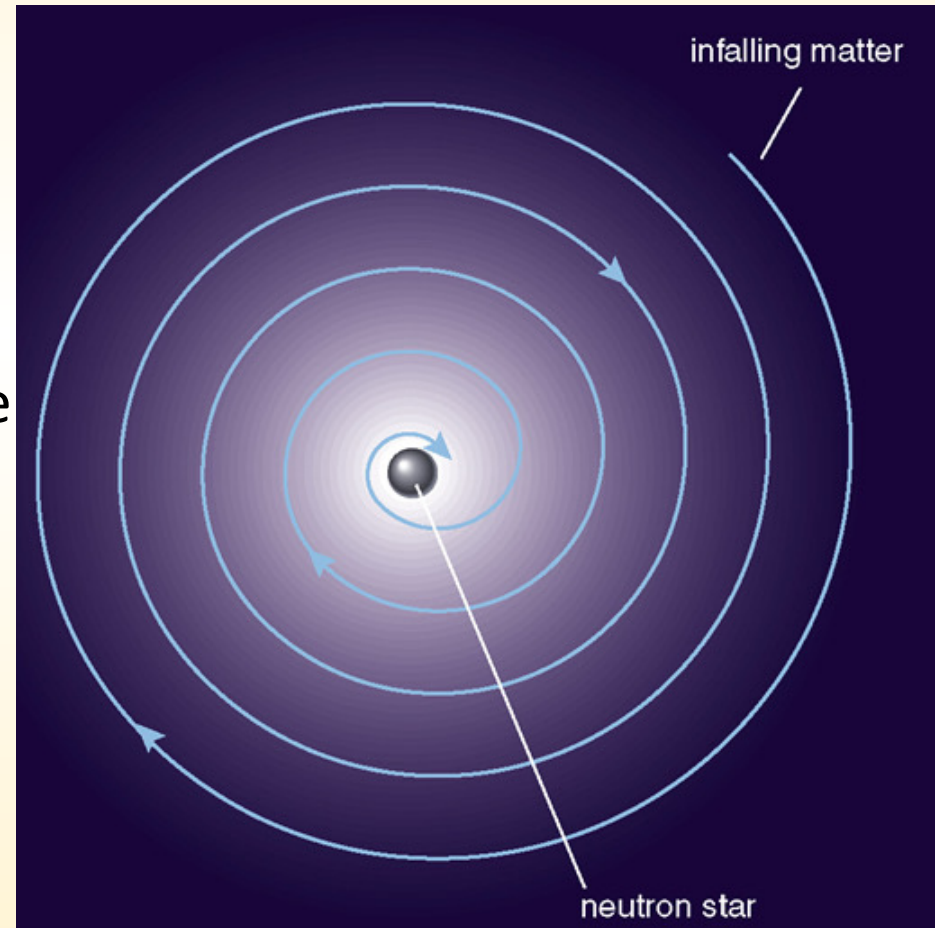


# Los períodos de rotación de las estrellas de neutrones

- Como un estrella de neutrones se hace vieja, su periodo es más largo.
- Los púlsares más jóvenes tienen los periodos más cortos.
- A veces un púlsar ab abrupto gira más rápido. Ese se llama un **glitch**.
- Existen púlsares con periodos de unos mili-segundos. Ellos están en sistemas binarios.

# El nacimiento de un púlsar de milisegundos

- Transferencia de masa a una estrella de neutrones en un sistema binario causa que el púlsar gira más rápido - a casi 1.000 veces por segundo !
- Al igual que los binarios con una enana blanca, un disco de acreción se forma alrededor de la estrella de neutrones.
- El disco se calienta mucho.
- Lo suficientemente caliente para emitir rayos X.
- Nos referimos a estos objetos como los binarios de rayos-X.





# Existen Novas de binarios de rayos-X ?

- Así como es el caso de las novas, el gas de hidrógeno se acrecienta en la superficie de la estrella de neutrones.
- Un depósito de hidrógeno, 1 metro de espesor, se forma en la estrella
- La presión es suficientemente alta para fusionar hidrógeno constantemente en la superficie...
- ...formando una capa de helio debajo
- Cuando las temperaturas alcanzan  $10^8$  K, el helio fusiona al instante y emite una “erupción” de energía.
- Estas "novas" de estrellas de neutrones se llaman estallidos de rayos-X (**X-ray burster**).
- Un estallido de rayos-X, que dura unos segundos, emite, cada “erupción” una luminosidad de  $10^5$  soles. Las explosiones se repiten cada pocas horas hasta cada pocos días.

# Black Holes (Agujeros Negros)

- Después de que una estrella masiva se convierte en una supernova y su núcleo tiene una masa  $> 3 M_{\text{sun}}$ , la fuerza de gravedad será demasiado fuerte para la degeneración de neutrones para detener el colapso.
- La estrella se derrumba en el olvido.

## GRAVEDAD POR FIN GANA!

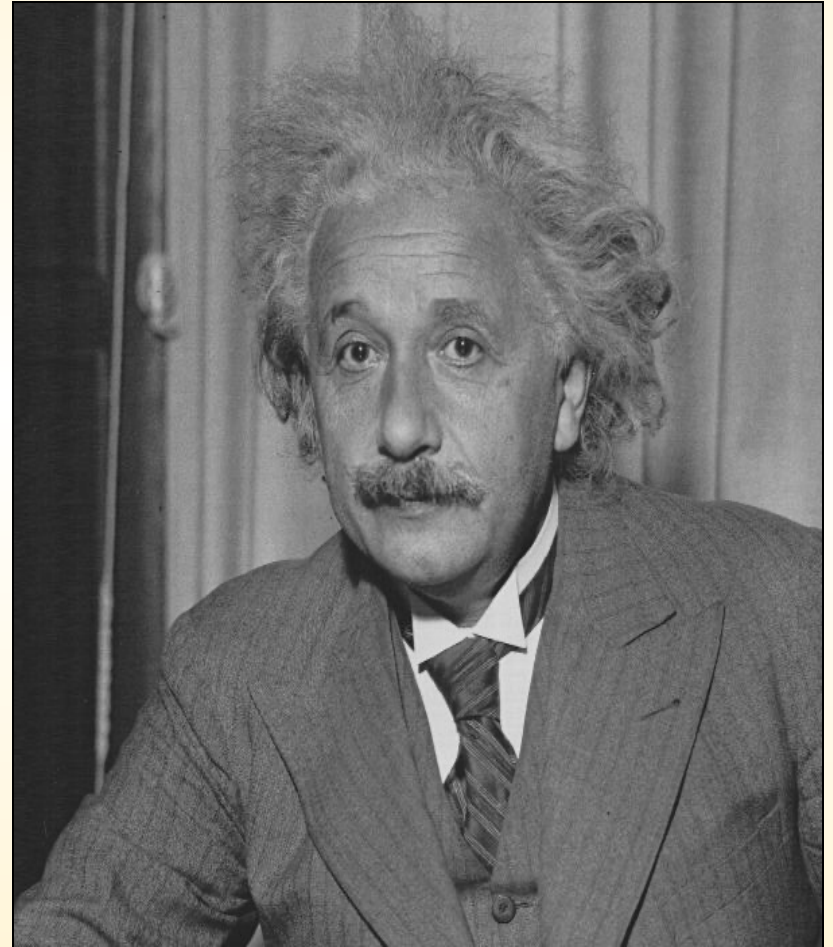
- Este objeto se llama un **agujero negro**.
- La estrella se vuelve un objeto infinitamente pequeño.
- Crea un "agujero" en el Universo
- Desde 3 masas solares o más se comprimen en un espacio infinitamente pequeño, la gravedad de la estrella es ENORME!

## ADVERTENCIA!

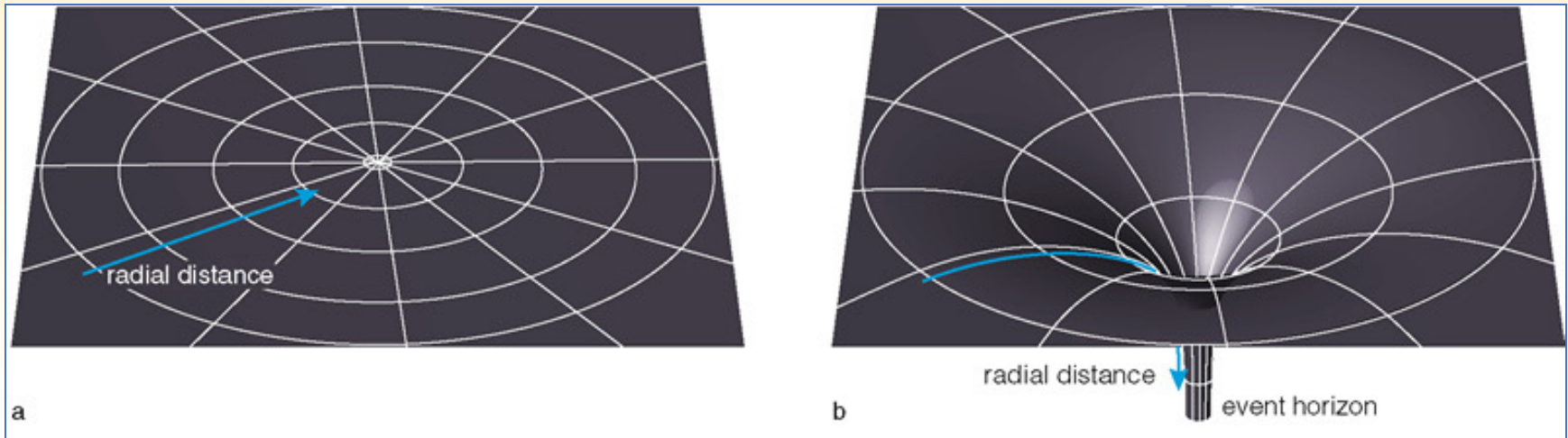
- La Ley de Gravedad de Newton ya no es válida !

# Black Holes

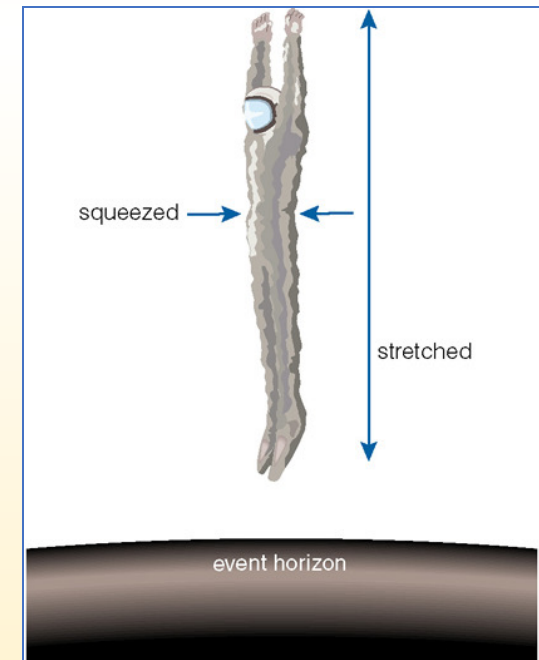
- De acuerdo a la teoría de relatividad de Einstein, la gravedad es realmente la curvatura del espacio-tiempo alrededor de un objeto con masa.
- Esto significa que incluso la luz se ve afectada por la gravedad.



# Curvatura del espacio por la gravedad

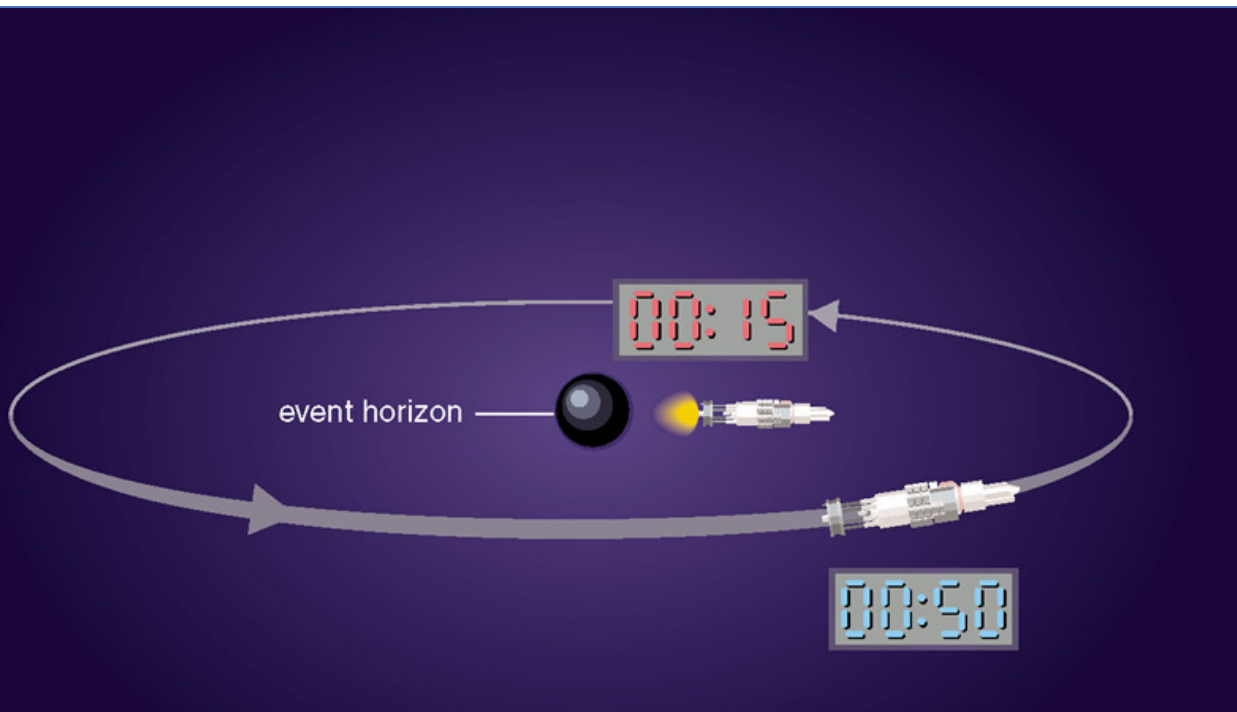


- La gravedad impone una curvatura en el espacio.
- a pesar de que no tiene masa, la luz se verá afectada por la gravedad
- a su paso por el espacio se doblará dentro del horizonte de sucesos, no puede salir del agujero
- Mientras que la materia se aproxima al horizonte de eventos ...las fuerzas de marea son enormes
- el objeto sería "espaghetterizado" (roto).



# Distorsión del tiempo por la gravedad

- En las proximidades del agujero negro, el tiempo se ralentiza.
- Si lanzamos una sonda, al acercarse al horizonte de eventos:
  - por ejemplo, se tarda 50 min de tiempo en la nave madre, dura solo 15 minutos en la sonda
  - de la vista de la nave madre, la sonda tarda una eternidad en llegar al horizonte de sucesos
- la luz de la sonda es desplazada al rojo



- Desde el punto de vista de la sonda:
  - se dirige directamente hacia el agujero negro
  - la luz de la nave madre es desplazada al azul

# "Tamaño" de un Agujero Negro

- Un agujero negro es un punto matemático y no tiene un tamaño.
- Espacio-tiempo es tan altamente deformado alrededor de un agujero negro, ni siquiera la luz puede escapar.
- **Radio de Schwarzschild**: la distancia de un agujero negro donde la velocidad de escape es igual a la velocidad de la luz.

$$R_s = 3 M \quad (R_s \text{ en km; } M \text{ en } M_{\odot})$$

- Una esfera de radio  $R_s$  alrededor del agujero negro se llama **horizonte de eventos**.

# No aspiran los Agujeros Negros?

- A lo lejos, un agujero negro ejerce fuerza gravitacional de acuerdo a la Ley de Newton.
- Al igual que cualquier otra estrella con la misma masa
- Si nuestro Sol fuera reemplazado por un agujero negro de  $1 M_{\text{sun}}$ , la órbita del planeta alrededor del Sol no cambiaría.
- Sólo a una distancia de  $3 R_s$  del agujero negro se aumentará la gravedad – más lo que predice la Ley de Newton.
- Entonces uno podría llegar a caer en un agujero negro

Un agujero negro no aspira todo a su alrededor!

# Encontrar Agujeros Negros

- Entonces, ¿cómo sabemos que los agujeros negros existen? Los detectamos en estrellas binarias de tipo rayos X (**X-ray binaries**)
- Podemos ver el efecto que un agujero negro tiene en su estrella compañera en una binaria de rayos X:
  - Cygnus X-1 fue el primer candidato bueno para un agujero negro
  - La tercera Ley de Kepler da una masa  $> 3 M_{\text{sun}}$  para el compañero invisible
  - No puede ser una estrella de neutrones
  - Lo único tan masivo, pero lo suficientemente pequeño para ser invisible es un agujero negro

